

Pengaruh Metode Analisis Stabilitas Lereng 3D terhadap Faktor Keamanan dan Kebutuhan Perkuatan pada Timbunan di Atas Tanah Lunak

Aisiyah Pramaisela Hapsari*, Queen Arista Rosmania Putri Sumarsono

Program Studi Teknik Sipil, Universitas Kadiri Jawa Timur

ARTICLE INFO

Kata Kunci:

Stabilitas Lereng; Analisis 3D;
Angka Keamanan; Limit
Equilibrium Method;
Geotextile.

***Correspondence email:**

aisiyahph@unik-kediri.ac.id

Submitted: 15 Juni 2026

Revised: 18 Juni 2026

Accepted: 19 Juli 2026

Published: 01 Agustus 2026

ABSTRAK

Analisis stabilitas lereng tiga dimensi (3D) semakin banyak digunakan dalam perencanaan geoteknik karena mampu merepresentasikan kondisi longsoran yang lebih mendekati kondisi lapangan dibandingkan analisis dua dimensi (2D). Perbedaan hasil antara metode analitis dan perangkat lunak berpotensi menghasilkan kebutuhan perkuatan yang berbeda. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan nilai faktor keamanan lereng tiga dimensi yang diperoleh menggunakan metode analitis dengan rumus Hovland dan perangkat lunak Plaxis LE serta mengevaluasi pengaruhnya terhadap kebutuhan perkuatan geotekstil. Analisis dilakukan menggunakan metode *Limit Equilibrium Method* (LEM) tiga dimensi pada beberapa variasi lebar, tinggi, kemiringan serta rasio Panjang bidang longsor terhadap tinggi timbunan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai faktor keamanan 3D berkisar antara 0,461 hingga 1,512. Perbandingan antara angka keamanan hasil analisis dan metode Hovland menunjukkan rasio bervariasi antara 0,256 hingga 1,618, yang menunjukkan adanya perbedaan nilai faktor keamanan yang cukup besar antara hasil PLAXIS LE 3D dan metode Hovland. Jumlah kebutuhan perkuatan geotekstil berkisar antara 0 hingga 37 lapis dan meningkat seiring bertambahnya nilai l/H , lebar timbunan, dan tinggi timbunan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemilihan metode analisis stabilitas lereng tiga dimensi berpengaruh terhadap angka keamanan dan kebutuhan perkuatan geotekstil sehingga perlu dipertimbangkan dalam proses perencanaan geoteknik.

ABSTRACT

Keywords:

Slope Stability; 3D analysis;
Safety Factor; Limit
Equilibrium Method;
Geotextile.

Three-dimensional (3D) slope stability analysis is increasingly used in geotechnical planning because it is able to represent landslide conditions more closely than two-dimensional (2D) analysis. Differences in results between analytical methods and software have the potential to result in different reinforcement requirements. This study aims to compare the three-dimensional slope safety factor values obtained using the analytical method with the Hovland formula and Plaxis LE software and evaluate their influence on the need for geotextile reinforcement. The analysis was conducted using the three-dimensional Limit Equilibrium Method (LEM) on several variations in width, height, slope, and the ratio of the length of the landslide plane to the height of the embankment. The results showed that the 3D safety factor values ranged from 0.461 to 1.512. A comparison between the safety factors obtained from the analysis and the Hovland method showed that the ratio varied between 0.256 and 1.618, indicating a considerable difference in safety factor values between the PLAXIS LE 3D results and the Hovland method. The required geotextile reinforcement ranged from 0 to 37 layers and increased with increasing l/H values, embankment width, and embankment height. The results of the study show that the selection of the three-dimensional slope stability analysis method influences the safety factor and the need for geotextile reinforcement, so it needs to be considered in the geotechnical planning process.

PENDAHULUAN

Indonesia dengan keberagaman bentang alamnya yang terdiri dari pegunungan, perbukitan, dataran tinggi dan dataran rendah mengharuskan pembangunan jalan di Indonesia dilakukan di atas timbunan dan galian yang tentunya perlu dipastikan keamanan dan kestabilannya. Kestabilan dari sebuah timbunan dapat diinterpretasikan dari nilai angka keamanan dari timbunan tersebut yang menurut (SNI 8460, 2017) untuk analisis kestabilan lereng adalah sebesar 1,5 .

Terdapat beberapa metode yang dapat digunakan untuk menganalisis kestabilan lereng yaitu metode *Limit Equilibrium Method* (LEM), *Finite Element Method* (FEM), *Finite Difference Method* (FDM), dan *Discrete Element Method* (DEM). Diantara berbagai metode *Limit Equilibrium Method* (LEM) merupakan metode yang paling sederhana dan banyak digunakan dalam praktek geoteknik terlebih dengan metode ini kebutuhan data yang diperlukan lebih sedikit dibandingkan dengan metode numerik lainnya. Konsep dasar metode LEM adalah menghitung rasio antara gaya penahan dan gaya penggerak pada bidang longsor yang diasumsikan, sehingga diperoleh angka keamanan lereng. Analisis Stabilitas lereng menggunakan metode ini dapat dilakukan dengan pendekatan 2D dan 3D dimana pendekatan 3D dianggap lebih mendekati kondisi di lapangan sebab dengan pendekatan ini bidang longsor direpresentasikan bersifat lokal dan tidak menerus. Analisis tiga dimensi juga dinilai lebih representatif untuk kondisi geometri lereng yang kompleks karena dapat memberikan gambaran angka keamanan dan bidang longsor yang lebih mendekati kondisi

lapangan (Azanna, 2021). (Firincioglu & Ercanoglu, 2021) menjelaskan bahwa analisis 3D mampu mempertimbangkan kontribusi tahanan samping (side resistance) yang tidak diperhitungkan dalam analisis 2D sehingga hasil yang diperoleh lebih sesuai dengan kondisi di lapangan. Selain itu, menurut (F. Zhang et al., 2024) perkembangan metode analisis stabilitas lereng 3D telah meningkatkan kemampuan insinyur geoteknik dalam mengevaluasi kondisi lereng yang kompleks dan lebih mendekati kondisi di lapangan.

Beberapa penelitian sebelumnya telah membandingkan hasil analisis stabilitas lereng menggunakan pendekatan 2D dan 3D. Penelitian dari (Afriade Siregar et al., 2021) menunjukkan faktor keamanan yang diperoleh dengan metode LEM Geo 5 dan FEM Plaxis 3D memiliki perbedaan yang relatif kecil (Fredlund et al., 2011.), menghasilkan faktor keamanan hasil analisis 3D cenderung lebih tinggi dibandingkan analisis 2D. Penelitian dari (Pratiwi et al., 2020) menunjukkan kondisi muka air tanah memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai faktor keamanan lereng pada pemodelan 3D. Perbedaan hasil dari setiap penelitian sebelumnya disebabkan oleh perbedaan jenis tanah, asumsi bidang longsor, dan kemiringan lereng yang digunakan sehingga data tersebut hanya dapat digunakan pada suatu lokasi tertentu dan tidak dapat digunakan secara umum.

Pada Penelitian (Shoffiana et al., 2022) menggunakan kondisi tanah berlapis yang umum dengan analisis menggunakan GeoStudio untuk analisis 2D dan metode Hovland secara manual untuk analisis 3D. Penelitian tersebut tidak menghitung *momen resistance* untuk stabilitas lereng 3D dan diasumsikan *momen resistance* yang terjadi pada metode 2D dan 3D adalah sama. Perhitungan stabilitas lereng 3D secara manual tentunya lebih rumit dan memerlukan waktu yang lebih lama saat analisis, hal ini dapat mengakibatkan terhambatnya proses perencanaan di lapangan. Selain itu, Nilai angka keamanan yang didapatkan dari program bantu mungkin akan berbeda dengan nilai angka keamanan yang diperoleh secara manual, perbedaan nilai angka keamanan ini memungkinkan terjadi perbedaan jumlah kebutuhan perkuatan yang diperoleh.

Selain itu, Sebagian besar penelitian terdahulu hanya berfokus pada pengembangan metode analisis, evaluasi pengaruh parameter tanah dan geometri lereng dan perbandingan nilai faktor keamanan yang dihasilkan dari berbagai metode analisis. Penelitian yang secara khusus membahas kinerja perangkat lunak berbasis LEM 3D yang digunakan dalam analisis stabilitas lereng, seperti Plaxis LE, masih relatif sedikit ditemukan. Di sisi lain, perkembangan penelitian stabilitas lereng 3D dalam beberapa tahun terakhir lebih banyak mengarah pada peningkatan akurasi model teoritis dan numerik dibandingkan evaluasi yang hasil analisisnya sesuai terhadap kebutuhan perkuatan di lapangan.

Berdasarkan kajian dari penelitian sebelumnya, sebagian besar hanya membandingkan faktor keamanan yang diperoleh dari analisis 2D dan 3D tanpa melakukan evaluasi lanjutan terkait dampaknya terhadap kebutuhan perkuatan lereng. Penelitian yang membandingkan hasil analisis LEM 3D antara metode analitis berdasarkan rumus Hovland dan metode berbasis perangkat lunak masih sangat terbatas dan kajian mengenai penggunaan perangkat lunak Plaxis LE untuk analisis stabilitas lereng berbasis LEM 3D serta implikasinya terhadap desain perkuatan lereng masih belum banyak dilaporkan dalam literatur. Padahal, perbedaan perbedaan nilai faktor keamanan yang dihasilkan dari masing-masing metode analisis sangat memengaruhi jenis, dimensi, dan jumlah perkuatan yang dibutuhkan sehingga akan berdampak langsung terhadap, aspek teknis, efisiensi desain, waktu pelaksanaan, dan biaya konstruksi. Beberapa hal tersebut adalah kesenjangan penelitian yang masih perlu dikaji lebih lanjut

Oleh karena itu, pada penelitian ini akan dievaluasi pengaruh perbedaan metode analisis LEM 3D, yaitu metode analitis berdasarkan formulasi Hovland dan metode berbasis perangkat lunak PLAXIS LE, terhadap nilai faktor keamanan serta kebutuhan perkuatan lereng yang dihasilkan. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang umumnya hanya membandingkan nilai faktor keamanan, penelitian ini menghubungkan hasil analisis stabilitas lereng dengan implikasi praktis terhadap desain perkuatan sehingga dapat memberikan rekomendasi metode yang lebih efektif dan efisien untuk digunakan dalam perencanaan geoteknik.

Tujuan penelitian ini adalah menganalisis dan membandingkan nilai faktor keamanan serta kebutuhan perkuatan lereng yang diperoleh dari analisis *Limit Equilibrium Method* (LEM) tiga dimensi menggunakan metode analitis dan perangkat lunak PLAXIS LE, sehingga dapat diketahui pengaruh pemilihan metode analisis terhadap hasil perencanaan stabilitas lereng serta diperoleh metode yang lebih efektif untuk diterapkan dalam praktik rekayasa

Tinjauan Pustaka

Limit Equilibrium Method (LEM)

LEM adalah metode analisis stabilitas lereng yang menggunakan prinsip kesetimbangan gaya. Metode analisis ini pertama-tama mengasumsikan bidang kelongsoran yang dapat terjadi. Terdapat tiga metode pada LEM, yaitu metode *circular*, metode *non circular*, dan metode irisan. Dari tiga metode tersebut, metode yang paling populer adalah metode irisan karena dapat mempertimbangkan kondisi tanah dan air yang berbeda, geometri yang kompleks, dan pengaruh gaya luar (L. L. Zhang et al., 2015). Selain itu, data yang dibutuhkan untuk metode irisan relatif sedikit apabila dibandingkan dengan metode lainnya (Dai et al., 2022). Stabilitas lereng dengan metode *limit equilibrium* dapat dilakukan dengan pendekatan 2D dan 3D. Metode Limit Equilibrium Method (LEM) 3D berkembang dengan berbagai formulasi antara lain metode Hovland, Hungr, Huang dan Tsai, serta Jiang dan Yamagami, yang masing-masing

memiliki asumsi berbeda terkait interaksi antar kolom dan keseimbangan gaya yang digunakan dalam perhitungan faktor keamanan (Sun et al., 2023)

Analisis Stabilitas Lereng 3D

Analisis stabilitas lereng 3D merepresentasikan kondisi lereng setempat atau tidak menerus sehingga lebih sesuai dengan keadaan sebenarnya di lapangan. Pengembangan metode stabilitas lereng 3D dilakukan dengan menggunakan metode kesetimbangan batas (LEM) maupun metode numerik seperti finite element method (FEM). Metode LEM 3D dikembangkan dengan membagi massa longsor menjadi irisan-irisan sehingga pengaruh dimensi ketiga dan tahanan samping (side resistance) dapat diperhitungkan dalam analisis stabilitas lereng (Qin et al., 2024). Metode (Hovland, 1977) adalah metode analisis stabilitas lereng 3D yang paling awal dan banyak dijadikan dasar pengembangan metode selanjutnya. Metode ini membagi massa longsor menjadi kolom-kolom vertikal dan menghitung faktor keamanan berdasarkan keseimbangan gaya pada setiap kolom.

PLAXIS LE

Plaxis LE adalah program pendukung yang dapat memodelkan dan menganalisis proyek geoteknik menggunakan Metode Keseimbangan Batas (LEM), dalam 2D dan 3D dalam satu aplikasi. Plaxis LE melakukan analisis menggunakan metode keseimbangan batas (LEM) atau metode berbasis tegangan dari metode perpotongan klasik seperti metode Bishop, Janbu, Spencer, Morgenstern-Price, GLE, dan Sarma (Banne et al., 2024).

Proses analisis di Plaxis LE dimulai dengan memilih konsep model yang digunakan, konsep model yang dapat dipilih adalah: Stabilitas Lereng, Konsolidasi, Air Tanah dan Dinamika, kemudian memilih sistem yang digunakan dalam 2D atau 3D, jika analisis yang dipilih adalah stabilitas lereng maka langkah selanjutnya adalah memilih program le yang berisi arah geser kanan, kanan ke kiri dan orientasi ganda. Langkah selanjutnya adalah menggambar geometri dan menentukan permukaan yang diinginkan dengan memasukkan koordinat area yang ingin dianalisis. Setelah penggambaran geometris dilakukan, langkah selanjutnya adalah mengatur model dan mengatur metode analisis. Metode analisis yang dapat digunakan meliputi metode biasa/Fellenius, Bishop yang disederhanakan, Janbu yang disederhanakan, Spencer, Morgenstern-Price, GLE (Fredlund), dan Sarma. Langkah selanjutnya adalah menentukan arah geser atau menentukan bidang dan sudut geser yang terjadi. Setelah itu, sifat-sifat material yang digunakan diatur. Input sifat material yang dibutuhkan dalam program bantu ini adalah nilai berat atau satuan gamma (γ), kohesi (c), dan sudut gesekan dalam tanah (ϕ) untuk setiap lapisan tanah yang digunakan. Setelah semua pengaturan dilakukan, analisis keseimbangan batas dapat dilakukan dan hasil analisis akan diketahui. Output yang diperoleh dari analisis menggunakan Plaxis LE adalah faktor keamanan (SF), momen tahanan, momen dorong, titik pusat longsor, dan jari-jari bidang longsor. (Banne et al., 2024)

Geotextile

Geotekstil adalah material sintesis permeabel yang bahan dasarnya terbuat dari tekstil polimer seperti poliester atau polipropilen. Geotekstil dapat digunakan atau berfungsi sebagai pemisah, filter, pelindung, dan penguat. Secara umum, geotekstil dibagi menjadi dua jenis, yaitu geotekstil tenun dan geotekstil non-tenun. Fungsi geotekstil tenun adalah sebagai material untuk menstabilkan lapisan tanah dasar (terutama pada lapisan tanah dasar yang lunak), karena memiliki kekuatan tarik yang lebih tinggi dibandingkan geotekstil non-tenun. (Luo et al., 2018)

Perhitungan jumlah penguatan geotekstil yang dibutuhkan dipengaruhi oleh kekuatan tarik geotekstil dalam menerima atau menahan gaya geser yang terjadi selama tanah longsor. Kekuatan tarik maksimum geotekstil (T_{ult}) yang digunakan dalam penelitian ini adalah 250 kN/m. Kekuatan tarik izin geotekstil dapat dihitung menggunakan Persamaan:

$$T_{all} = T_{ult} \left(\frac{1}{F_{SID} \cdot F_{SCR} \cdot F_{SCD} \cdot F_{SBD}} \right) \quad (1)$$

Dimana :

- T_{all} = kekuatan tarik izin geotextile yang tersedia
- T_{ult} = kekuatan tarik ultimate geotextile
- F_{SID} = faktor keamanan akibat kesalahan pemasangan
- F_{SCR} = faktor keamanan akibat rangkai
- F_{SCD} = faktor keamanan akibat pengaruh kimia
- F_{SBD} = faktor keamanan akibat pengaruh biologi

Dalam menghitung jumlah tulangan yang dibutuhkan dengan geotekstil, diperlukan data seperti kekuatan tarik geotekstil (T_{all}), nilai faktor keamanan (SF), momen tahan (MR), titik pusat garis kegagalan, dan jari-jari kegagalan

(R). Jumlah tulangan yang dibutuhkan diperoleh dari perhitungan momen yang akan ditahan oleh geotekstil (ΔMR) dengan Persamaan 2 hingga 4:

$$MD = \frac{MR_{eksisting}}{SF} \quad (2)$$

$$\Delta MR = MR_{rencana} - MR_{eksisting} \quad (3)$$

$$\Delta MR = (SF_{rencana} \times MD) - MR_{eksisting} \quad (4)$$

dimana:

MD = momen pendorong

MR = momen penahan

SF = nilai faktor keamanan eksisting

SF rencana = nilai faktor keamanan rencana atau minimal = 1,5 (SNI 8460:2017 Pasal 7.5.5)

ΔMR = momen yang akan ditahan oleh geotextile

Perhitungan jumlah kebutuhan geotextile dilakukan secara bertahap hingga total momen dari geotextile ($\Sigma M_{geotextile}$) sama atau lebih besar dari ΔMR dengan Persamaan 2.15 s/d 2.17 :

$$M_{geotextile} = T_{all} \times T_i \quad (5)$$

$$\Sigma M_{geotextile} \geq \Delta MR \quad (6)$$

$$\Sigma (T_{all} \times T_i) \geq \Delta MR \quad (7)$$

dimana:

T_i = jarak vertikal masing-masing geotextile terhadap titik pusat kelongsoran

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode komparatif. Penelitian dilakukan untuk membandingkan hasil analisis stabilitas lereng tiga dimensi menggunakan metode analitis Hovland yang diperoleh dari penelitian terdahulu dengan hasil analisis menggunakan perangkat lunak PLAXIS LE. Perbandingan dilakukan terhadap nilai faktor keamanan (*factor of safety*) serta kebutuhan perkuatan lereng yang diperoleh dari masing-masing metode analisis.

Perbandingan antara hasil PLAXIS LE 3D dan metode Hovland dalam penelitian ini dilakukan berdasarkan data sekunder dari penelitian terdahulu. Oleh karena itu, perbandingan ini tidak dimaksudkan sebagai validasi absolut antar-metode, melainkan sebagai evaluasi indikatif terhadap perbedaan nilai faktor keamanan yang dapat muncul akibat perbedaan pendekatan analisis, asumsi bidang longsor, dan proses perhitungan.

Data Tanah Dasar

Data tanah dasar yang digunakan dalam penelitian ini adalah data tanah yang mengacu pada tesis Shoffiana, dkk (2022). Data tanah dasar ini berupa data tanah lunak dengan konsistensi sangat lunak, lunak, dan sedang. Ketebalan tanah lunak yang digunakan adalah 30 meter dengan rincian 3 m konsistensi sangat lunak, 14 m konsistensi lunak, dan 13 m konsistensi sedang.

Data Tanah Timbunan

Tanah timbunan yang digunakan dalam penelitian ini adalah tanah sirtu. Parameter tanah timbunan tersebut meliputi berat volume (γ) sebesar 19 kN/m³, kohesi 0, sudut gesekan 30° dan q sebesar 15 kN/m² (sebagai beban lalu lintas).

Variasi Timbunan

Variasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

Lebar bagian atas tanggul bervariasi berdasarkan jenis jalan sebagai berikut:

- Lebar jalan normal ($B = 7 - 15$ m) $\rightarrow$ 7 m, 10 m, 13 m
- Lebar jalan tol ($B = 15 - 30$ m) $\rightarrow$ 15 m, 20 m, 25 m, 30 m

Variasi tinggi tanggul yang digunakan adalah 4 m, 6 m, 8 m

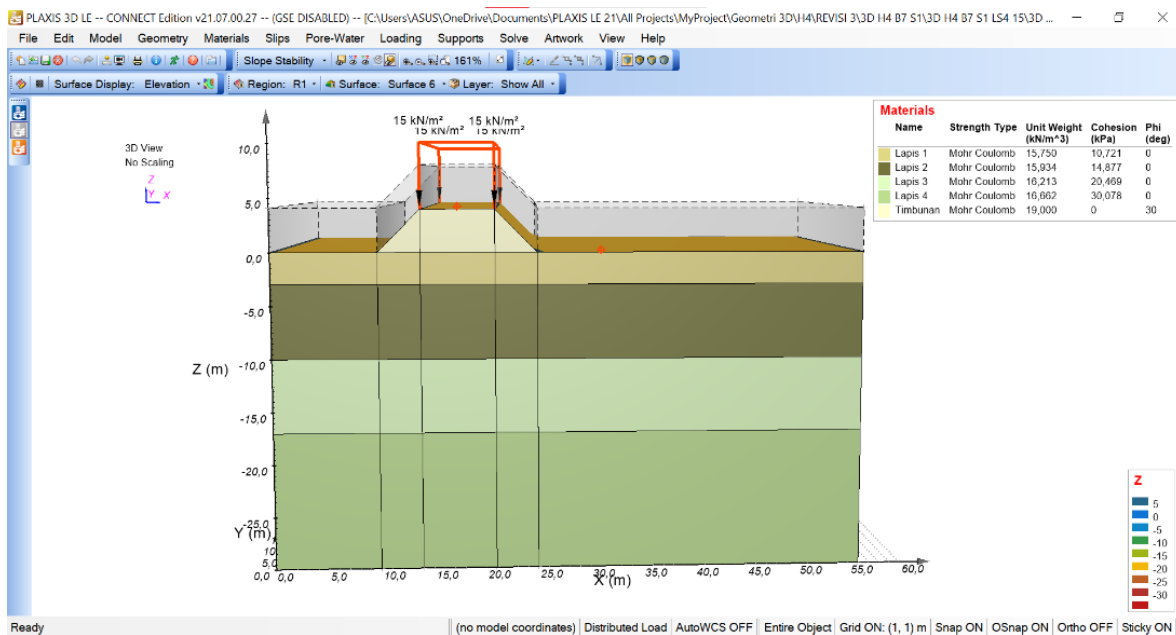
Variasi kemiringan tanggul yang digunakan adalah 1:1 dan 1:2

HASIL

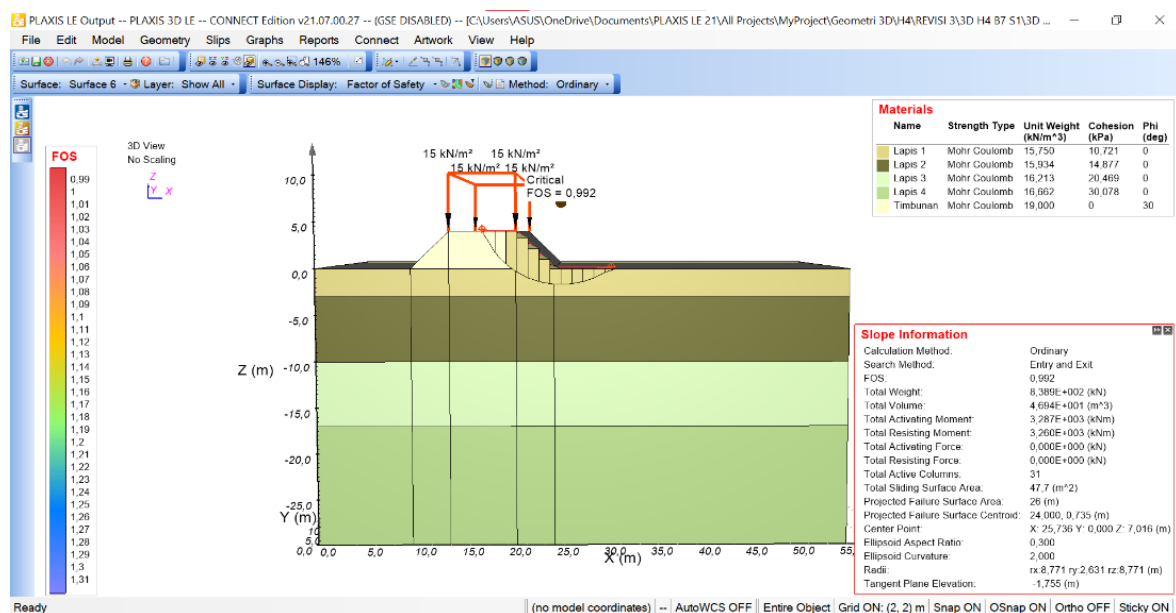
Hasil Perhitungan Angka Keamanan dengan Plaxis LE

Analisis stabilitas lereng 3D dilakukan menggunakan metode *limit Equilibrium Method* (LEM). Seperti pada analisis 2D program bantu yang digunakan adalah Plaxis LE, analisis menggunakan Metode Fellenius (Fellenius, 1936) atau *Ordinary Method*. Penggambaran bidang longsor pada analisis 3D ini mengacu pada bidang longsor 2D yang mempunyai kebutuhan perkuatan terbanyak dan Panjang bidang longsor arah sumbu y dilakukan untuk variasi $l_s/H = 1$, $l_s/H = 2$, dan $l_s/H = 4$ dimana l_s adalah Panjang bidang longsor searah sumbu y dan H adalah tinggi timbunan.

Pemodelan dilakukan untuk semua variasi tinggi, lebar dan kemiringan timbunan. Dari setiap pemodelan akan diperoleh nilai faktor keamanan, titik pusat longsor (X, Y dan Z), radius (R_x , R_y dan R_z), dan *momen resistance* (M_{res}) yang akan digunakan untuk menghitung kebutuhan perkuatan lereng. Contoh pemodelan dan hasil analisis stabilitas lereng pada timbunan $H = 4$ m, $B = 7$ m, dan slope 1:1 untuk $l_s/H = 1$ ditunjukkan seperti Gambar 1 dan Gambar 2. Analisis yang sama dilakukan untuk seluruh variasi tinggi, lebar dan kemiringan timbunan dan rekapitulasi nilai SF stabilitas lereng 3D dengan Plaxis LE dapat dilihat pada Tabel.1



Gambar 1. Pemodelan dengan Plaxis LE 3D Pada Timbunan $H = 4$ m, $B = 7$ m dan Slope 1:1



Gambar 2. Hasil *running* Plaxis LE 3D untuk timbunan $H = 4$ m, $B = 7$ m, dan Slope 1:1 untuk $l_s/H = 1$

Tabel 1. Rekapitulasi Nilai SF Analisa Stabilitas Lereng dengan Plaxis LE 3D

Timbunan (m)	Kemiringan	SF 3D								
		Htimb = 4 m			Htimb = 6 m			Htimb = 8 m		
		ls/H = 1	ls/H = 2	ls/H = 4	ls/H = 1	ls/H = 2	ls/H = 4	ls/H = 1	ls/H = 2	ls/H = 4
7	1:1	0,992	0,821	0,738	0,796	0,741	0,704	0,654	0,609	0,599
	1:2	1,404	1,081	0,966	0,983	0,753	0,720	0,731	0,634	0,575
10	1:1	1,129	1,009	0,923	0,758	0,650	0,624	0,591	0,533	0,526
	1:2	1,419	1,083	0,938	0,991	0,764	0,675	0,759	0,639	0,578
13	1:1	1,205	0,958	0,849	0,706	0,639	0,585	0,594	0,518	0,499
	1:2	1,421	1,092	0,945	0,922	0,750	0,669	0,734	0,611	0,547
15	1:1	1,162	0,922	0,832	0,749	0,655	0,588	0,546	0,505	0,483
	1:2	1,395	1,114	0,948	0,974	0,778	0,677	0,721	0,604	0,540
20	1:1	1,181	0,939	0,840	0,777	0,650	0,581	0,577	0,499	0,463
	1:2	1,391	1,016	0,908	0,934	0,769	0,665	0,726	0,599	0,529
25	1:1	1,243	0,988	0,861	0,783	0,652	0,586	0,596	0,504	0,461
	1:2	1,391	1,128	0,946	0,960	0,769	0,665	0,739	0,603	0,552
30	1:1	1,297	1,044	0,907	0,828	0,690	0,614	0,609	0,533	0,477
	1:2	1,512	1,162	0,984	0,967	0,786	0,672	0,740	0,619	0,570

Berdasarkan Tabel 1. dapat diketahui bahwa SF 3D yang diperoleh beragam yaitu berkisar antara 0,461 hingga 1,512. Terlihat hubungan antara SF dan ls/H untuk semua variasi ketinggian, lebar dan kemiringan timbunan adalah semakin besar ls/H, maka faktor keamanan (SF) yang terjadi semakin kecil. Hasil penelitian ini sesuai dengan hasil penelitian serupa dari Shoffiana, dkk (2022) yang menyatakan bahwa semakin besar nilai ls/H, maka nilai faktor keamanannya semakin kecil.

Perbandingan Angka Keamanan Plaxis LE 3D dengan Metode Analitis Hovland

Hasil angka keamanan dari Plaxis LE 3D selanjutnya dibandingkan dengan hasil angka keamanan yang dihitung secara manual dengan perumusan Hovland berdasarkan hasil dari penelitian (Shoffiana et al., 2022). Pada Tabel 2 menyajikan nilai faktor keamanan hasil PLAXIS LE 3D, nilai faktor keamanan metode Hovland dari data acuan, serta rasio perbandingan keduanya.

Tabel 2. Rekapitulasi Perbandingan Angka Keamanan 3D Plaxis LE dan Hovland

H (m)	B (m)	Kemiringan	ls/H	SF 3D PLAXIS LE	SF 3D HOVLAND	SF 3D PLAXIS LE/ SF 3D HOVLAND
4	7	1:1	1	0,992	1,160	0,855
			2	0,821	0,904	0,908
			4	0,738	0,741	0,996
		1:2	1	1,404	1,577	0,890
			2	1,081	1,061	1,019
			4	0,966	0,825	1,171
	10	1:1	1	1,129	1,510	0,748
			2	1,009	1,013	0,996
			4	0,923	0,795	1,162
		1:2	1	1,419	1,949	0,728
			2	1,083	1,249	0,867
			4	0,938	0,876	1,071
4	13	1:1	1	1,205	2,082	0,579
			2	0,958	1,312	0,730
			4	0,849	0,918	0,925
		1:2	1	1,421	2,363	0,601
			2	1,092	1,508	0,724
			4	0,945	1,031	0,917
	15	1:1	1	1,162	2,569	0,452
			2	0,922	1,623	0,568
			4	0,832	1,162	0,716
		1:2	1	1,395	3,004	0,464
			2	1,114	1,863	0,598
			4	0,948	1,257	0,754
4	20	1:1	1	1,181	3,523	0,335
			2	0,939	2,241	0,419
			4	0,840	1,573	0,534
		1:2	1	1,391	4,057	0,343
			2	1,016	2,317	0,438
			4	0,908	1,518	0,598
	25	1:1	1	1,243	3,523	0,353
			2	0,988	2,241	0,441
			4	0,861	1,573	0,547
		1:2	1	1,391	4,057	0,343
			2	1,128	2,317	0,487

H (m)	B (m)	Kemiringan	Ls/H	SF 3D PLAXIS LE	SF 3D HOVLAND	SF 3D PLAXIS LE/ SF 3D HOVLAND
6	30	1:1	4	0,946	1,518	0,623
			1	1,297	3,523	0,368
			2	1,044	2,241	0,466
			4	0,907	1,573	0,576
		1:2	1	1,512	4,057	0,373
			2	1,162	2,317	0,501
			4	0,984	1,518	0,648
		1:1	1	0,796	0,588	1,353
			2	0,741	0,489	1,516
			4	0,704	0,483	1,457
		1:2	1	0,983	0,794	1,237
			2	0,753	0,575	1,311
			4	0,720	0,520	1,384
	10	1:1	1	0,758	0,716	1,059
			2	0,650	0,531	1,224
			4	0,624	0,497	1,255
		1:2	1	0,991	0,908	1,091
			2	0,764	0,634	1,205
			4	0,675	0,541	1,248
		1:1	1	0,706	0,917	0,770
			2	0,639	0,628	1,018
			4	0,585	0,538	1,088
		1:2	1	0,922	1,164	0,792
			2	0,750	0,755	0,993
			4	0,669	0,619	1,080
	15	1:1	1	0,749	1,110	0,675
			2	0,655	0,723	0,906
			4	0,588	0,601	0,978
		1:2	1	0,974	1,283	0,759
			2	0,778	0,830	0,937
			4	0,677	0,670	1,011
		1:1	1	0,777	1,667	0,466
			2	0,650	1,063	0,611
			4	0,581	0,850	0,684
		1:2	1	0,934	1,771	0,527
			2	0,769	1,109	0,693
			4	0,665	0,826	0,806
	25	1:1	1	0,783	2,548	0,307
			2	0,652	1,545	0,422
			4	0,586	1,167	0,502
		1:2	1	0,960	2,162	0,444
			2	0,769	1,350	0,570
			4	0,665	0,994	0,669
		1:1	1	0,828	3,230	0,256
			2	0,690	2,098	0,329
			4	0,614	1,563	0,393
		1:2	1	0,967	2,162	0,447
			2	0,786	1,350	0,582
			4	0,672	0,994	0,676
8	7	1:1	1	0,654	0,404	1,618
			2	0,609	0,400	1,522
			4	0,599	0,400	1,498
		1:2	1	0,731	0,517	1,415
			2	0,634	0,429	1,477
			4	0,575	0,415	1,385
	10	1:1	1	0,591	0,460	1,283
			2	0,533	0,406	1,314
			4	0,526	0,404	1,303
		1:2	1	0,759	0,606	1,253
			2	0,639	0,461	1,387
			4	0,578	0,426	1,357
		1:1	1	0,594	0,543	1,094
			2	0,518	0,434	1,194
			4	0,499	0,421	1,186
		1:2	1	0,734	0,721	1,018
			2	0,611	0,539	1,134
			4	0,547	0,465	1,177
	15	1:1	1	0,546	0,605	0,902
			2	0,505	0,454	1,112
			4	0,483	0,440	1,099
		1:2	1	0,721	0,808	0,892
			2	0,604	0,558	1,083
			4	0,540	0,490	1,102

H (m)	B (m)	Kemiringan	Ls/H	SF 3D PLAXIS LE	SF 3D HOVLAND	SF 3D PLAXIS LE/ SF 3D HOVLAND
8	20	1:1	1	0,577	0,928	0,622
			2	0,499	0,648	0,771
			4	0,463	0,560	0,827
		1:2	1	0,726	0,998	0,727
			2	0,599	0,687	0,872
			4	0,529	0,562	0,941
	25	1:1	1	0,596	1,294	0,461
			2	0,504	0,713	0,707
			4	0,461	0,703	0,656
		1:2	1	0,739	1,268	0,583
			2	0,603	0,838	0,720
			4	0,552	0,730	0,757
	30	1:1	1	0,609	1,687	0,361
			2	0,533	1,144	0,466
			4	0,477	0,890	0,536
		1:2	1	0,740	1,268	0,583
			2	0,619	0,838	0,739
			4	0,570	0,730	0,781

Berdasarkan Tabel 2. diketahui perbandingan antara nilai *safety factor* 3D Plaxis LE dan nilai *safety factor* Hovland sangat bervariasi antara 0,256 - 1,618. Dapat lihat untuk ketinggian timbunan 4 meter rasio perbandingan SF Plaxis LE dan Hovland cenderung kurang dari 1. Hal ini menunjukkan bahwa faktor keamanan 3D plaxis LE lebih kecil dari faktor keamanan Hovland. Dengan kata lain nilai faktor keamanan plaxis LE lebih kritis daripada nilai faktor keamanan Hovland. Namun apabila dilihat untuk ketinggian timbunan 8 meter dapat diketahui rasio perbandingan SF Plaxis LE dan Hovland lebih dari 1. Perbedaan ini dapat dikarenakan bidang longsor yang ditinjau pada plaxis LE dan Hovland berbeda.

Hasil Perhitungan Moment Resistance 3D

Analisis stabilitas lereng menggunakan aplikasi Plaxis LE selain menghasilkan nilai angka keamanan (*safety factor*) juga akan didapatkan nilai *moment resistance* yang nantinya akan digunakan untuk menghitung jumlah kebutuhan perkuatan geotekstilnya. Pada output Plaxis LE 3D, nilai *moment resistance* yang ditampilkan merupakan *moment resistance* total pada bidang longsor tiga dimensi dengan satuan kNm. Nilai tersebut tidak dapat langsung digunakan dalam perhitungan kebutuhan geotekstil karena kapasitas tarik geotekstle dinyatakan dalam satuan kN/m. sehingga dalam penelitian ini, nilai tersebut dikonversi menjadi momen per satuan panjang bidang longsor dengan membagi momen total terhadap $\frac{1}{2}$ ls. Oleh karena itu, nilai momen yang digunakan dalam perhitungan kebutuhan geotekstil dinyatakan dalam satuan kNm/m. Sebagai contoh untuk variasi H = 4 m, ls/H = 1 maka *momen resistance output* dari Plaxis LE dibagi 2 m, variasi H = 4 m, ls/H = 2 *momen resistance output* Plaxis LE dibagi 4 m dan pada variasi H = 4 m, ls/H = 4 *momen resistance output* Plaxis LE dibagi 8 m. Konversi *moment resistance* total menjadi momen per satuan panjang dilakukan agar satuan momen dari output PLAXIS LE 3D konsisten dengan kapasitas tarik geotekstil yang dinyatakan dalam kN/m. Oleh karena itu, hasil kebutuhan perkuatan pada penelitian ini dipahami sebagai estimasi desain berbasis pendekatan per satuan panjang bidang longsor.

Rekapitulasi *moment resistance* per satuan panjang yang digunakan dalam perhitungan kebutuhan perkuatan geotextile dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Rekapitulasi Moment Resistance per Satuan Panjang Bidang Longsor

B Timbunan Kemiringan		Momen Resistance (kNm)								
(m)		ls/H = 1	ls/H = 2	ls/H = 4	ls/H = 1	ls/H = 2	ls/H = 4	ls/H = 1	ls/H = 2	ls/H = 4
7	1:1	1630	1180	1010	2736	2448	2299	3700	3201	3181
	1:2	3803	2337	1883	5723	3505	3441	6193	4803	3815
10	1:1	3675	2615	2279	3600	2792	2577	4455	3814	3613
	1:2	5640	3430	2674	7340	4668	3638	9243	7500	6588
13	1:1	4678	3235	2698	4120	3803	3005	5345	4380	4109
	1:2	7325	5160	4148	8007	6103	5112	10800	8349	7313
15	1:1	5210	3625	3061	5310	4197	3636	5660	4980	4582
	1:2	8305	5730	4639	9657	7325	6044	11590	9093	7863
20	1:1	7120	4848	4083	7047	5388	4560	7633	6038	5399
	1:2	9200	6013	4954	12087	9010	7353	14200	10865	9306
25	1:1	9485	6653	5273	8977	6772	5672	9640	7418	6519
	1:2	14275	9360	7315	14917	11023	8950	17530	13188	10781
30	1:1	12095	8518	6625	11767	8428	6837	11798	8993	7756
	1:2	17725	11490	8834	18473	13088	10400	20945	15613	12694

Perhitungan Kebutuhan Perkuatan untuk Stabilitas Lereng 3D

Perkuatan lereng dalam penelitian ini menggunakan geotekstil dengan kuat tarik ultimit (Tult) sebesar 250 kN/m. Nilai kuat tarik izin geotekstil (Tall) dihitung dengan mempertimbangkan beberapa faktor reduksi. Nilai parameter desain yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Parameter Desain Geotekstile

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Kuat Tarik Geotekstile	Tult	250	kN/m
Faktor Pemasangan	FS _{ID}	1,30	-
Faktor Rangkak	FS _{CR}	1,75	-
Faktor Kimia	FS _{CD}	1,25	-
Faktor Biologi	FS _{BD}	1,15	-
Kuat Tarik Izin Geotekstile	Tall	76,445	kN/m

Contoh Perhitungan Kebutuhan Jumlah Lapis Perkuatan Geotekstil 3D

Berikut merupakan contoh perhitungan kebutuhan geotextile untuk timbunan dengan H = 4 m, B = 7 m, Slope 1:1, dan Ls/H = 1 Hasil analisis Plaxis LE untuk faktor keamanan ditunjukkan pada Gambar 3.

Slope Information	
Calculation Method:	Ordinary
Search Method:	Entry and Exit
FOS:	0,992
Total Weight:	8,389E+002 (kN)
Total Volume:	4,694E+001 (m ³)
Total Activating Moment:	3,287E+003 (kNm)
Total Resisting Moment:	3,260E+003 (kNm)
Total Activating Force:	0,000E+000 (kN)
Total Resisting Force:	0,000E+000 (kN)
Total Active Columns:	31
Total Sliding Surface Area:	47,7 (m ²)
Projected Failure Surface Area:	26 (m)
Projected Failure Surface Centroid:	24,000, 0,735 (m)
Center Point:	X: 25,736 Y: 0,000 Z: 7,016 (m)
Ellipsoid Aspect Ratio:	0,300
Ellipsoid Curvature:	2,000
Radii:	rx:8,771 ry:2,631 rz:8,771 (m)
Tangent Plane Elevation:	-1,755 (m)

Gambar 3. Hasil Analisis Plaxis LE timbunan dengan variasi H = 4 m, B = 7 m, Slope 1:1, dan Ls/H = 1

Perhitungan Momen Dorong

Momen Dorong

Momen Dorong (M_D) dapat dihitung menggunakan persamaan berikut :

$$\begin{aligned}
 M_D &= \frac{M_{res}}{SF} \\
 &= \frac{1630}{0,992} \\
 &= 1643,15 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

Perhitungan Delta Moment Resistance (ΔM_R)

Delta *moment resistance* adalah momen tambahan yang diperlukan untuk menahan tanah agar tidak terjadi kelongsoran. SF rencana yang digunakan pada penelitian adalah 1,5 (SNI 8460:2017). Perhitungan Delta *Moment Resistance* (ΔM_R) adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 M_R \text{ rencana} &= M_D \times SF \text{ rencana} \\
 &= 1643,15 \times 1,5 \\
 &= 2464,72 \text{ kNm} \\
 \Delta M_R &= M_R \text{ rencana} - M_R \text{ eksisting} \\
 &= 2464,72 - 1630 \\
 &= 834,72 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

Perhitungan T_{allowable}

Kekuatan ultimate geotextile (Tult) yang digunakan pada penelitian ini sebesar 250 kN/m. Geotextile digunakan sebagai perkuatan lereng (*slope stablitation*). Berdasarkan Tabel 4 diperoleh besar faktor reduksi sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 FS_{ID} &= 1,3 \\
 FS_{CR} &= 1,75 \\
 FS_{CD} &= 1,25 \\
 FS_{BD} &= 1,15 \text{ Sehingga diperoleh nilai } T_{\text{allowable}} \text{ adalah sebagai berikut :} \\
 Tall &= Tult \left(\frac{1}{FS_{ID} \cdot FS_{CR} \cdot FS_{CD} \cdot FS_{BD}} \right) \\
 &= 250 \left(\frac{1}{1,3 \cdot 1,75 \cdot 1,25 \cdot 1,15} \right) \\
 &= 76,445 \text{ kN/m}
 \end{aligned}$$

Perhitungan Jumlah Kebutuhan Geotextile

Jumlah kebutuhan geotextile dilakukan dengan cara membandingkan besarnya ΔMR dan momen penahan yang diberikan oleh geotextile.

Layer 1

$$\begin{aligned}
 Ti &= Z = 7,016 \text{ m} \\
 M_{\text{geotextile}} &= Tall \times Ti \\
 &= 76,445 \times 7,016 \\
 &= 536,34 \text{ kNm} \\
 \Sigma M_{\text{geotextile}} &\geq \Delta M_R \\
 536,34 \text{ kNm} &< 834,72 \text{ kNm (KURANG)}
 \end{aligned}$$

Layer 2

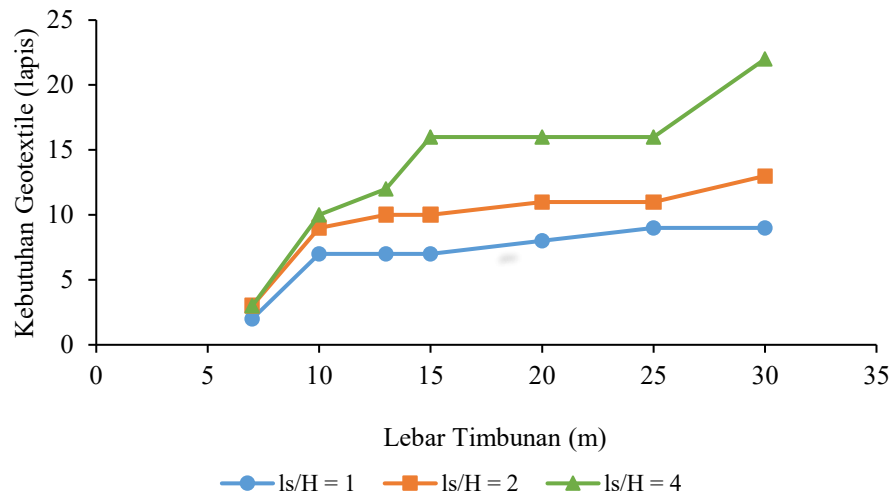
Jarak pemasangan antar geotextile (S_v) adalah sebesar 0,25 m, Sehingga :

$$\begin{aligned}
 Ti &= Y - S_v \\
 &= 7,016 - 0,25 \\
 &= 6,766 \text{ m} \\
 M_{\text{geotextile}} &= Tall \times Ti \\
 &= 76,445 \times 6,766 \\
 &= 517,229 \text{ kNm} \\
 \Sigma M_{\text{geotextile}} &\geq \Delta M_R \\
 536,34 + 517,229 \text{ kNm} &< 834,72 \text{ kNm} \\
 1053,569 \text{ kNm} &> 834,72 \text{ kNm (CUKUP)}
 \end{aligned}$$

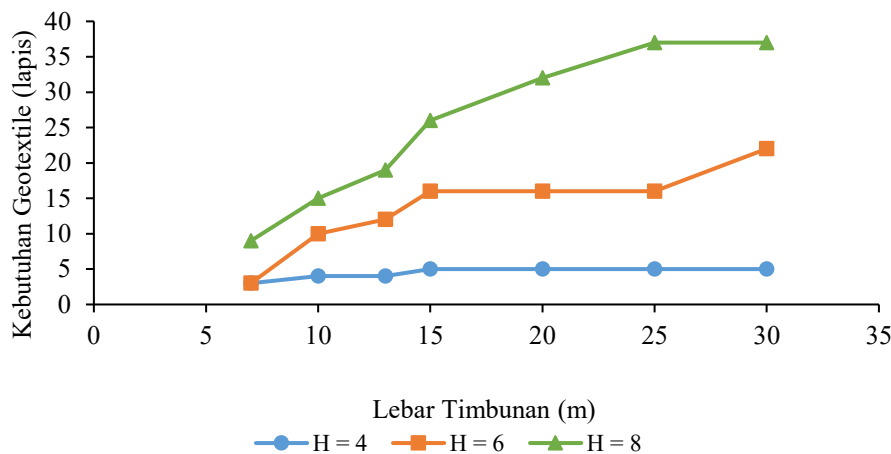
Cara yang sama dilakukan untuk semua variasi timbunan. Rekapitulasi kebutuhan perkuatan dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Rekapitulasi Jumlah Lapis Perkuatan Geotekstil 3D

B Timbunan Kemiringan (m)		Perkuatan Geotextile 3D								
		Is/H = 1	Is/H = 2	Is/H = 4	Is/H = 1	Is/H = 2	Is/H = 4	Is/H = 1	Is/H = 2	Is/H = 4
7	1:1	2	3	3	2	3	3	8	9	9
	1:2	1	2	3	4	4	9	6	12	12
10	1:1	2	3	4	7	9	10	13	15	15
	1:2	1	2	3	4	8	9	9	13	30
13	1:1	2	4	4	7	10	12	13	19	19
	1:2	1	3	4	5	10	12	15	19	33
15	1:1	2	4	5	7	10	16	15	20	26
	1:2	1	3	4	5	10	16	15	19	33
20	1:1	2	4	5	8	11	16	15	29	32
	1:2	1	3	5	6	10	16	15	23	35
25	1:1	2	4	5	9	11	16	15	29	37
	1:2	1	3	5	6	10	16	15	23	35
30	1:1	2	4	5	9	13	22	15	30	37
	1:2	0	3	5	6	10	17	15	23	35



Gambar 4. Grafik Hubungan antara lebar timbunan dan kebutuhan geotextile untuk timbunan H = 6 Slope 1:1



Gambar 5. Grafik Hubungan antara lebar timbunan dan kebutuhan geotextile untuk timbunan dengan ls/H = 4 dan Slope 1:1

Berdasarkan Tabel 5 dan Gambar 4, dapat diketahui bahwa dengan tinggi dan lebar timbunan yang sama, semakin besar nilai ls/H maka jumlah kebutuhan lapis geotekstil semakin meningkat. Selain itu, pada tinggi timbunan yang sama, semakin besar lebar timbunan maka jumlah kebutuhan lapis geotekstil juga cenderung meningkat. Berdasarkan Gambar 5, pada lebar timbunan dan nilai ls/H yang sama, semakin tinggi timbunan maka jumlah kebutuhan lapis geotekstil semakin meningkat.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dapat disimpulkan bahwa nilai angka keamanan lereng yang diperoleh menggunakan Plaxis LE 3D antara 0,461 hingga 1,512. Nilai ini menunjukkan bahwa Sebagian model timbunan masih dalam kondisi tidak aman karena memiliki angka keamanan lebih kecil dari nilai minimum yang dipersyaratkan dalam SNI 8460:2017, yaitu sebesar 1,5. Perbandingan antara nilai *safety factor* 3D Plaxis LE dan nilai *safety factor* Hovland menunjukkan variasi yang cukup besar dengan rasio perbandingan antara 0,256 - 1,618. Hasil ini menunjukkan bahwa perbedaan pendekatan antara PLAXIS LE 3D dan formulasi Hovland dapat menghasilkan nilai faktor keamanan yang berbeda. Namun, interpretasi hasil perlu dibatasi karena asumsi bidang longsor dan pendekatan perhitungan pada kedua metode tidak sepenuhnya identik. Hasil analisis menunjukkan jumlah kebutuhan lapis perkuatan geotekstil 3D berkisar antara 0 hingga 37 lapis yang bergantung pada geometri timbunan dan nilai angka keamanan yang dihasilkan. Semakin rendah angka keamanan maka semakin besar jumlah kebutuhan perkuatan untuk mencapai kondisi stabil yang dipersyaratkan. Berdasarkan penelitian penggunaan Plaxis LE dapat menghasilkan evaluasi stabilitas lereng 3D yang berbeda dibandingkan metode Hovland, sehingga perlu dipertimbangkan dengan cermat pemilihan metode analisis dalam proses perencanaan.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standardisasi Nasional. (2017). SNI 8460:2017 Persyaratan perancangan geoteknik. Badan Standardisasi Nasional.
- Afriade Siregar, C., Ali Syakir Ashidik, F., & Garnida, H. (2021). Perbandingan Stabilitas Lereng Antara Metode Keseimbangan Batas (Lem) Dan Metode Elemen Hingga (FEM) Studi Kasus: Kereta Api Cepat Indonesia Cina (KCIC) Walini, Kabupaten Bandung Barat. In Seminar Nasional Ketekniksipilan, Infrastruktur dan Industri Jasa Konstruksi (KIIJK) (Vol. 1, Number 1).
- Azanna, D. O. (2021). Analisis stabilitas lereng tiga dimensi. *Jurnal Talenta Sipil*, 4(2), 210–213. <https://doi.org/10.33087/talentasipil.v4i2.76>
- Banne, S. P., Dhawale, A. W., Patil, R. B., Girase, M., Kulkarni, C., Dake, M., & Khan, S. (2024). Slope Stability Analysis of Xanthan Gum Biopolymer Treated Laterite Soil Using Plaxis Limit Equilibrium Method (PLAXIS LE). *KSCE Journal of Civil Engineering*, 28(4), 1205–1216. <https://doi.org/10.1007/s12205-024-0553-2>
- Dai, Z., Yang, J., Dai, R., & Zhu, Q. (2022). Three-Dimensional and Threefold Nonlinear Numerical Modeling for Slope-Stabilizing Pile. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 26(11), 4390–4406. <https://doi.org/10.1007/s12205-022-1474-6>
- Fellenius, W. (1936). Calculation of the stability of earth dams. *Proceedings of the Second Congress on Large Dams*, 4, 445–462.
- Firincioglu, B. S., & Ercanoglu, M. (2021). Insights and perspectives into the limit equilibrium method from 2D and 3D analyses. *Engineering Geology*, 281, 105968. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105968>
- Fredlund, M. D., Lu, H., & Fredlund, D. G. (2011). Three-dimensional limit equilibrium slope stability benchmarking. In *Slope Stability 2011 Conference*.
- Hovland, H. J. (1977). Three-dimensional slope stability analysis method. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 103(9), 971–986.
- Luo, F., Zhang, G., Liu, Y., & Ma, C. (2018). Centrifuge modeling of the geotextile reinforced slope subject to drawdown. *Geotextiles and Geomembranes*, 46(1), 11–21. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2017.09.001>
- Pratiwi, D. S., Lesmana, N., & Hamdhan, I. N. (2020). Analisis Stabilitas Lereng Menggunakan Model Numerik 3 Dimensi Studi Kasus Lereng Sekolah Terpadu di Kecamatan Jonggol Bogor. *Indonesian Journal of Construction Engineering and Sustainable Development (CESD)*, 3(2), 54–63. <https://doi.org/10.25105/cesd.v3i2.8323>
- Qin, Y., Chen, Y., Lai, J., Qiu, J., Wang, Z., Liu, T., & Zan, W. (2024). Failures in loess slope-tunnel system: An overview of triggering sources, acting mechanism and mitigation strategies. *Engineering Failure Analysis*, 158, 107996. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.107996>
- Shoffiana, A., Lastiasih, Y., & Rendy Satrya, T. (2022). Comparison of Embankment Reinforcement Requirements with Geotextile on Soft Soil with 2D and 3D Slope Stability Analysis Methods. *Journal of Infrastructure and Facility Asset Management*, 4(2).
- Sun, Z., Wang, B., Li, Y., Xu, J., & Ji, J. (2023). 3D limit analysis of rock slopes based on equivalent linear failure criterion with tension cut-off. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 15(12), 3118–3130. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.02.009>
- Zhang, F., Jia, S., & Gao, Y. (2024). Recent advances in stability analysis and design of 3D slopes. *Frontiers in Built Environment*, 10. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2024.1410474>
- Zhang, L. L., Fredlund, M. D., Fredlund, D. G., Lu, H., & Wilson, G. W. (2015). The influence of the unsaturated soil zone on 2-D and 3-D slope stability analyses. *Engineering Geology*, 193, 374–383. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.05.011>